

Première évaluation des possibilités d'exploitation de la télédétection spatiale pour l'étude du fonctionnement d'une plantation de palmiers à huile à Nord-Sumatra

B. NAERT (1), R. GAL (2), A. U. LUBIS (3), SUWANDI (4), J. OLIVIN (5)

Résumé. — Le Satellite pour l'observation de la terre (SPOT) fournit des images dont le haut pouvoir de définition (pixel de 20 m en mode multispectral) permet d'envisager leur utilisation dans le suivi agronomique d'une plantation de palmier à huile, en particulier pour la nutrition minérale. Dans ce but, une expérimentation de nutrition minérale a été mise en place en 1981 dans la plantation de palmiers à huile d'Adolina (PTP VI) à Nord-Sumatra, selon un protocole établi conjointement par l'IRHO et la station de recherche de Marihat (PTP VI-VII) et avec les conseils du centre national d'études spatiales de Toulouse (CNES France). L'expérience comportait 14 parcelles expérimentales (N, P, K, Mg) de 8 hectares chacune, plantées en 1975. Un suivi agronomique annuel comportant l'analyse d'échantillons foliaires, l'enregistrement de la production et l'évolution de l'état sanitaire a été effectué par la station de Marihat. Une première image a été saisie en juin 1986 dans le cadre du programme d'évaluation préliminaire du satellite SPOT, son exploitation a été réalisée en 1987 en utilisant les techniques du traitement numérique, alliées à des observations de terrain. Considérée comme une étude préliminaire, cette interprétation a fait ressortir des relations entre les valeurs de la réflectance dans le proche infra-rouge (canal XS₃) et les teneurs foliaires (N, P, Mg, S) ainsi qu'avec l'Indice Foliaire (L.A.I.).

Le canal XS₂ et l'Indice de Végétation Normalisé $\frac{XS_3 - XS_2}{XS_3 + XS_2}$ apportent des informations complémentaires plutôt liées aux caractéristiques

végétatives et à l'état sanitaire. Un certain nombre de problèmes d'ordre méthodologique sont apparus au cours de l'analyse ; certains sont dus à la durée de l'expérience (apparition d'une maladie, le Ganoderma) tandis que d'autres sont liés aux conditions locales comme la difficulté d'obtenir des images à des dates déterminées à cause de la couverture nuageuse, d'autres enfin proviennent de l'environnement (âge de la plantation, sols, réserves en eau...). Ces premiers résultats sont suffisamment encourageants pour inciter à poursuivre la recherche méthodologique, dans le cadre de la collaboration scientifique entre la Station de Marihat et l'IRHO, afin de développer une technique de diagnostic sur l'état et le fonctionnement des plantations de palmier à huile

INTRODUCTION

Le fonctionnement d'une plantation de palmiers à huile et le rendement qui en résulte dépendent d'un très grand nombre de facteurs, parmi lesquels l'alimentation minérale est au premier plan. Les sols de la zone intertropicale humide sont, en effet, très souvent pauvres en éléments minéraux disponibles, du fait de leur évolution pédologique. Le potentiel de production du matériel végétal sélectionné ne peut alors s'exprimer qu'après correction des déficiences minérales du sol par des apports d'engrais dont la programmation est faite à partir d'un diagnostic foliaire effectué chaque année sur un échantillon prélevé sur 20 à 30 palmiers au sein de chacune des LSU (Leaf Sample Unit) de la plantation. Les teneurs en éléments minéraux des feuilles de cet échantillon sont comparées à la teneur optimale déduite de l'expérimentation d'accompagnement pour la détermination des doses de fumures par l'intermédiaire de barèmes « ad hoc » [1].

Cette méthode a fait depuis très longtemps la preuve de sa fiabilité dans la gestion des fumures des plantations. Son utilisation est universelle. Elle présente néanmoins certaines faiblesses dues au fait que le nombre d'échantillons que l'on peut prélever et analyser est forcément limité. En effet, il n'est généralement pas possible de constituer des LSU de

moins de 25, voire 100 ha : c'est-à-dire que seulement 7 à 1,7 % des arbres font l'objet d'un prélèvement. Le choix des « arbres DF » est donc important car la représentativité de l'échantillon dans la LSU en dépend. La variabilité peut échapper même à un observateur averti car la nutrition minérale peut devenir déficiente bien avant que les symptômes visuels n'apparaissent. Par ailleurs, la méthode est relativement statique du fait de la difficulté d'effectuer plusieurs couvertures de prélèvements foliaires par an.

Dès 1981, il a paru possible d'envisager que l'interprétation des images de satellites puisse apporter une réponse pour perfectionner le suivi agronomique des plantations. Il n'est évidemment pas envisagé de se priver actuellement de l'utilisation du diagnostic foliaire, mais plutôt de compléter celui-ci. Pour préparer l'exploitation du satellite SPOT (6) qui dispose d'un haut pouvoir de résolution spatiale (pixel de 20 m en mode multi-spectral), une expérimentation adaptée a donc été mise en place en 1982 en collaboration avec Marihat Research Center (Indonésie) et avec les conseils du CNES (France) dans une plantation de palmiers à huile (Adolina) située à Nord-Sumatra. Une image SPOT a été prise en juin 1986. L'interprétation a été effectuée conjointement par Marihat et l'IRHO en 1987. Celle-ci a comporté une analyse numérique de l'image et l'établissement des corrélations existant entre les mesures radiométriques (signatures spectrales) et les mesures de certains paramètres physiologiques.

(1) INRA Montpellier (France), Télédétection.

(2) Ingénieur agronome (France).

(3) Directeur de la Station de Marihat (Indonésie).

(4) Directeur Adjoint de la Station de Marihat (Indonésie).

(5) Division Agronomie IRHO/CIRAD (France)

(6) Satellite pour l'observation de la terre.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

— La plantation d'Adolina (PTP VI) est située à 36 km à l'est de Medan (nord-Sumatra) à 3° 37' 30" de latitude nord et à 9° 57' 20" de longitude est. Les précipitations annuelles (1 541 mm en moyenne de 1977 à 1986) se répartissent en une saison très pluvieuse de septembre à décembre et une période moins arrosée de janvier à août. La topographie est plane. Les sols dérivés de formations volcaniques et alluviales appartiennent à 4 types pédologiques : 2 types de régosols sableux qui diffèrent par leur capacité de drainage, une série

de grès hydromorphes très compacts et une série de sols alluviaux. La nappe phréatique est proche de la surface dans les deux derniers cas.

— L'expérience, d'une surface totale de 112 ha, a été mise en place en 1982 dans les cultures 1975 situées essentiellement sur les régosols avec quelques inclusions de sols hydromorphes et alluviaux (Fig. 1). Elle comporte 7 traitements répétés 2 fois. Chaque parcelle élémentaire, d'une surface de 8 ha (400 m × 200 m), est subdivisée en sous-parcelles de 1 ha (5 × 5 pixels). Cependant à cause des

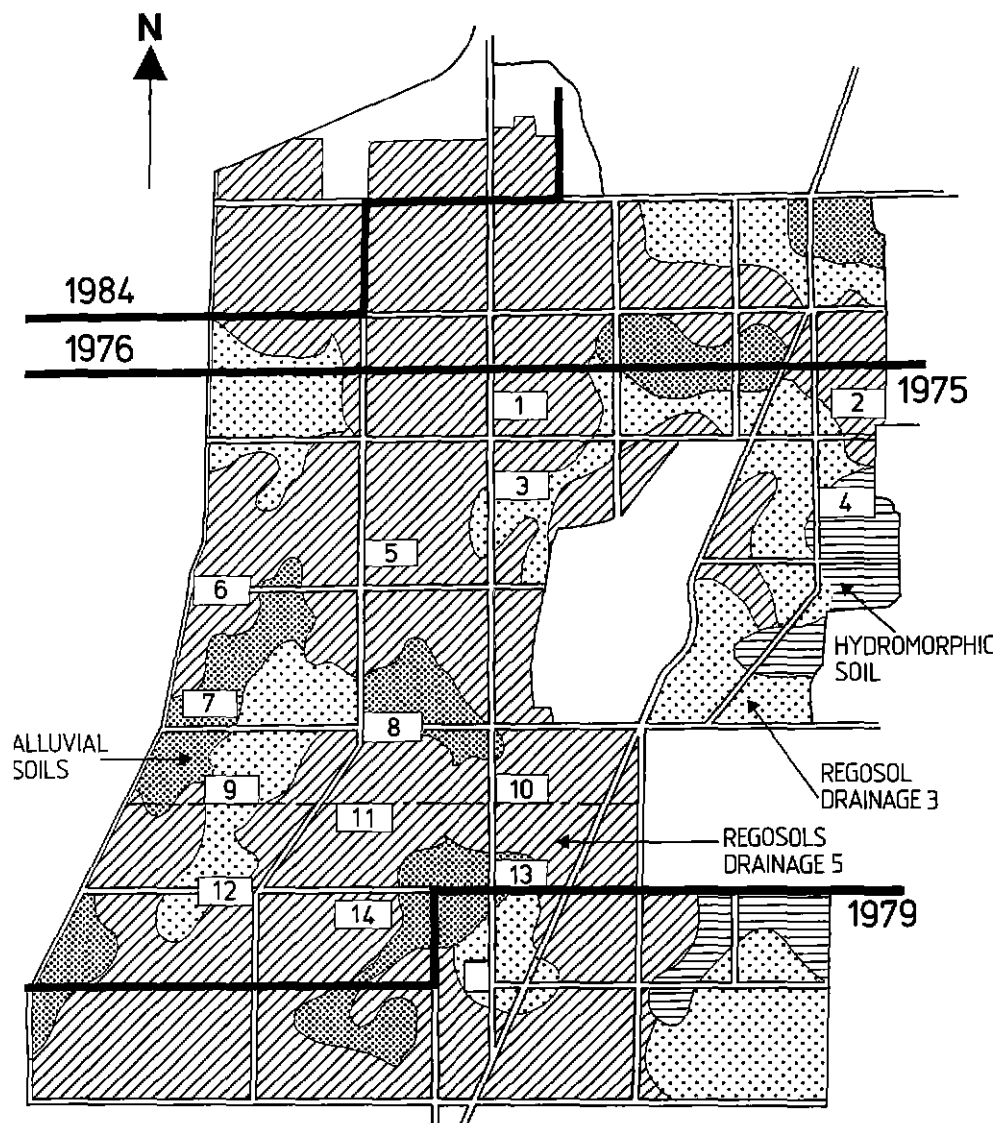


FIG. 1. — Carte pédologique de la plantation d'Adolina (Source : station de recherche de Marihat) — (Soil map of the Adolina plantation — Source : Marihat research station).

Expérience de télédétection Localisation des parcelles — (Remote sensing experiment Plot location)

Traitements (Treatments)	Parcelles (Plots)		Traitements (Treatments)	Parcelles (Plots)	
T (N P K Mg)	6	13	KO (N P Mg)	3	9
NO (P K Mg)	2	14	MgO (N P K)	5	12
PO (N K Mg)	7	10	NOMgO (P K)	1	8
			TO (NO PO KO MgO)	4	11

TABLEAU I. — **Expérience Télédétection — Traitements (kg/arbre/an) —**
(Remote sensing experiment — Treatments kg/tree/yr)

Traitements (Treatments)	Sulfate d'ammonium (Ammonium sulfate)	Phosphate de roche (Rock phosphate)	Chlorure de potassium (Potassium chloride)	Kieserite sulfate de magnésium (Kieserite magnesium sulphate)
Fumure complète N P K Mg = T (Complete fertilizer)	3	2	3	1.5
N ₀	0	2	3	1.5
P ₀	3	0	3	1.5
K ₀	3	2	0	1.5
Mg ₀	3	2	3	0
N ₀ Mg ₀	0	2	3	0
Témoin = T ₀ (Control)	0	0	0	0

difficultés rencontrées lors de la mise en place, il n'a pas été possible de regrouper en un seul bloc les parcelles de chaque répétition (Fig. 1). Les 7 traitements étudiés et les doses d'engrais (kg/arbre) appliquées annuellement en 2 fois (avril et août) depuis 1981 figurent au tableau I.

— Le suivi agronomique effectué au niveau de chaque sous-parcelle de 1 ha a comporté à partir de 1981 le prélèvement d'un échantillon foliaire annuel (feuille 17 sur 30 arbres par sous-parcelle) ainsi qu'un relevé du nombre d'arbres atteints de *ganoderma*. Les dosages ont été faits par le laboratoire de Maribat et également par celui du CIRAD pour les échantillons de 1986 et 1987.

— L'image SPOT (1) exploitée est multispectrale. Elle a été saisie le 8 juin 1986 sous un angle de visée de 19° 3. Les trois canaux qui la composent couvrent respectivement les domaines de longueur d'onde suivants :

- XS₁ : 500-559 µm,
- XS₂ : 610-680 µm, Vert,
- XS₃ : 790-890 µm, Proche Infra-Rouge (PIR).

Chacun des canaux contient 3 000 × 3 000 pixels (picture elements) de 20 mètres et codés sur 256 niveaux (8 bits). Ces données ont subi un prétraitement « de niveau 1b », c'est-à-dire des corrections radiométriques et géométriques liées aux déformations systématiques introduites par le système : rotation de la terre, effets panoramiques, effet de filé, angle de visée. Si, en toute rigueur, ils ne permettent pas une projection cartographique, à l'échelle du domaine expérimental concerné, elles s'avèrent cependant suffisantes par rapport à la précision du fonds cartographique disponible. L'information stockée concerne une superficie de 30 × 30 km. Les données ont été fournies sous la forme d'une bande magnétique CCT (Computer Compatible Tape) 6 250 BPI et de trois films photographiques représentant les visualisations à l'échelle du 1/400 000 des trois canaux enregistrés.

— Le protocole expérimental a compris trois phases successives :

a) une phase préliminaire au laboratoire au cours de laquelle les images et données numériques disponibles ont

été « prétraitées » ; c'est-à-dire qu'elles ont été préparées par des traitements « standard » destinés à en améliorer la présentation pour en rendre la lecture plus facile (Fig. 2, 3 et 4),

b) une phase intermédiaire de terrain destinée à confronter les données de télédétection à la réalité observable et mesurable par les méthodes classiques afin de tirer les informations significatives et remettre en cause les méthodes et conditions expérimentales définies *a priori*,

c) une phase de synthèse enfin dont le but était d'améliorer la méthode d'analyse par l'apprentissage et de tirer un certain nombre de propositions spécifiques et de conclusions sur l'usage de l'imagerie satellite.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Discussion des résultats obtenus sur le plan technique.

— Dans la phase préliminaire en laboratoire.

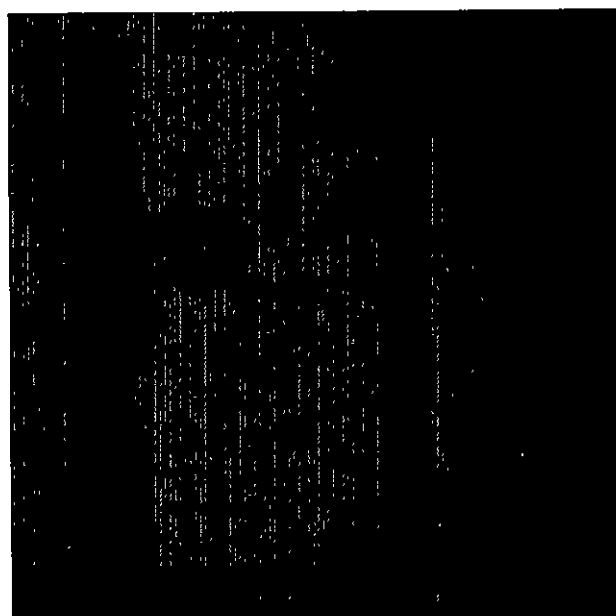
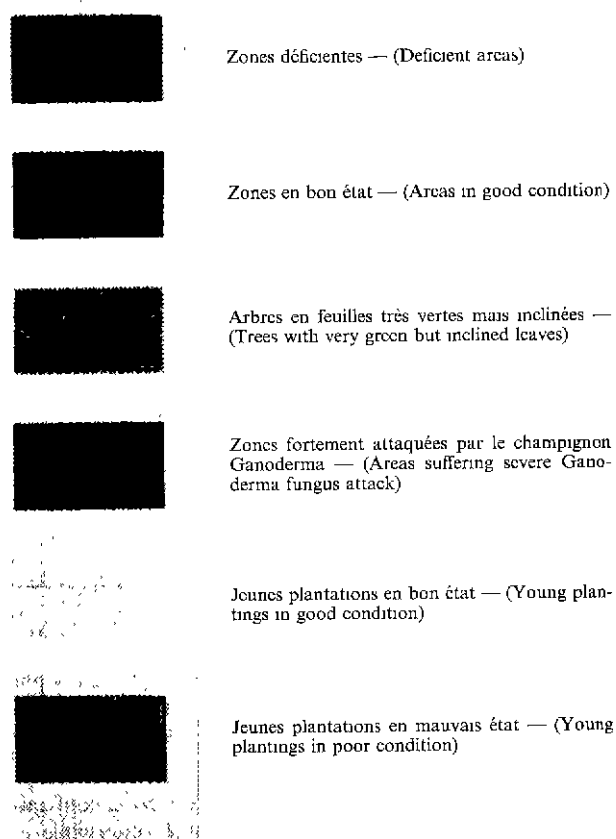
• Des extraits d'images ont été agrandis à l'échelle et rendus superposables aux cartes existantes pour faciliter la photointerprétation et le repérage de terrain. Sur ces extraits, un certain nombre de traitements photographiques destinés à augmenter les contrastes des différents canaux et à mettre en relief les différences entre les canaux (2) ont été effectuées (Fig. 5). A l'usage ces documents se sont révélés être de bons moyens de repérage, mais leur représentation analogique en noir et blanc s'est avérée insuffisante pour une interprétation cartographique objective. Leur traduction en équidensités colorées devrait en faciliter l'emploi [2].

• Des « imageries » de 256 × 256 pixels, couvrant le site expérimental, ont été analysées à l'aide d'une unité de traitement d'images (3) afin : d'améliorer la dynamique du signal par un étalonnage linéaire des valeurs utiles de l'imagerie, réaliser un certain nombre de combinaisons de données classiquement utilisées... pour étudier les corrélations existant entre les informations provenant du terrain et celles des différents canaux [3].

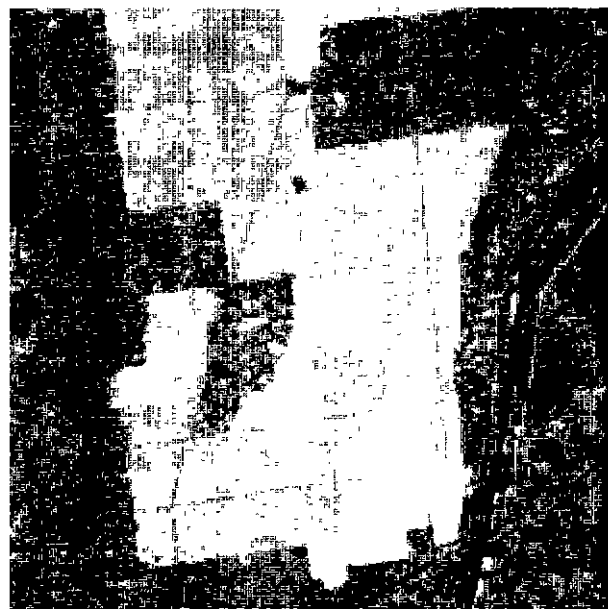
(2) Tirage de la superposition du négatif du XS₂ et du positif du XS₃, par exemple

(3) Pericolor 1000 du CIRAD/DETEC (délégation télédétection)

(1) Cataloguée sous la référence KJ : 264-343

FIG 2 — Image brute canal 3 (XS_3) — (Raw channel 3 image).

Il est ainsi apparu que les canaux XS_1 et XS_2 étaient suffisamment corrélés (Fig. 6) pour qu'en première analyse, le canal XS_1 soit jugé inutile. La distribution des réflectances du canal XS_3 est bimodale (Fig. 8) et les valeurs correspondantes au pic le plus élevé permettent d'identifier les plantations de palmier à huile des rizières environnantes (dont les réflectances sont plus faibles). Dans ce canal, peu de différences apparaissent à l'intérieur de la plantation elle-même, par rapport aux différences perceptibles dans l'environnement extérieur (Fig. 8). L'usage de l'indice de végétation [4]

FIG 3 — Composition colorée $1VG, 1B, XS_1$ — (Colored composition VGI, BI, XS_1).FIG 4 — Lissage de l'indice de végétation seuil. $M = 199, W = 15, D = 8$ — (Smoothed seuil vegetation index).

normalisé (1) qui donne une représentation à la fois de l'activité chlorophyllienne et de la densité du couvert végétal s'est révélé utile pour subdiviser les plantations (Fig. 4).

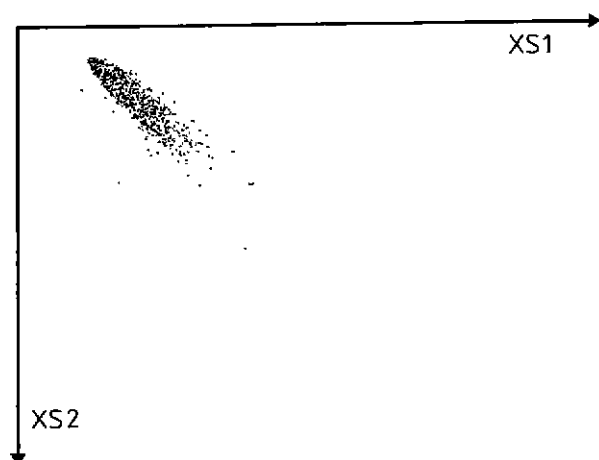
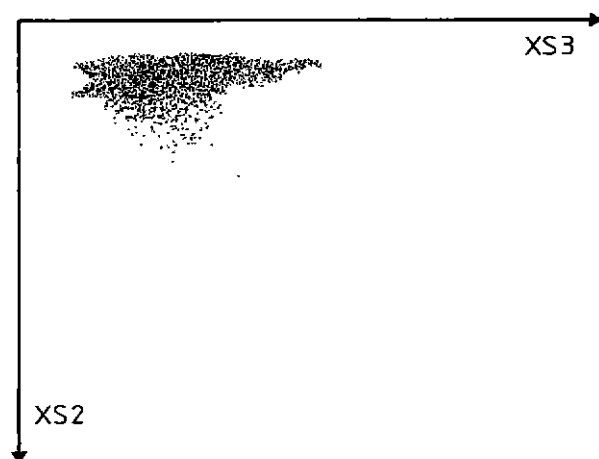
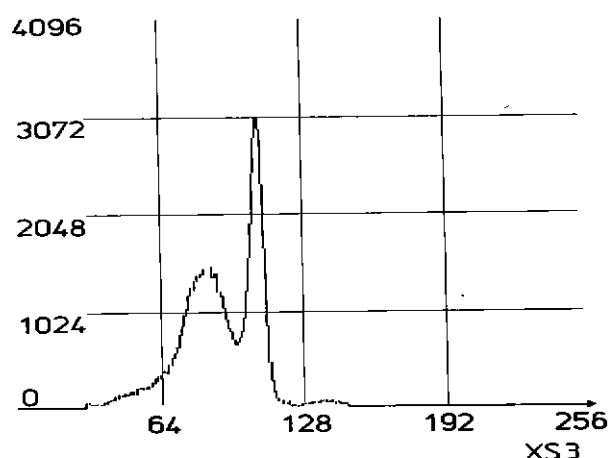
Un « lissage » des données par la méthode des « fenêtres glissantes » (2) a été nécessaire pour obtenir des documents ayant une signification cartographique exploitable.

(1) $IVG = XS_3 - XS_2/XS_3 + XS_2$.

(2) Affectation au pixel de la valeur la plus représentée de la matrice des 8, 24... plus proches pixels.



FIG 5. —

FIG. 6 — Corrélation XS_1 , XS_2 — (Correlation XS_1 , XS_2).FIG. 7 — Corrélation XS_1 , XS_3 — (Correlation XS_1 , XS_3).FIG. 8 — Histogramme unidimensionnel sur le canal 3 (XS_3) — (One-dimensional channel 3 histogram (XS_3)).
a = Nombre de pixels — (Number of pixels).

— La phase de terrain a remis en cause le protocole expérimental initialement prévu à cause de la mortalité élevée consécutive à une attaque brutale du champignon ganoderma qui s'est déclarée en 1984/1985. La maladie, qui

TABLEAU II. — Evolution annuelle du *ganoderma* dans l'expérience. % d'arbres malades et morts. — (Annual *ganoderma* evolution in the experiment. % of dead and diseased trees)

Année (year)	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987
Moyenne de l'expérience (Mean for experiment)	0.6	1.2	3.3	5.0	17	23	31
Traitements (Treatments)	T	N ₀	P ₀	K ₀	Mg ₀	N ₀ Mg ₀	T ₀
1987	24	29	29	30	27	42	33

se développe en taches irrégulières, avait provoqué la mort de 23 % des arbres de l'expérience en 1986 lors de la prise de la scène SPOT et de 31 en 1987 lors des observations de terrain (Tabl. II).

Pour éviter que les « effets de sol » provoqués par la disparition de certains arbres ne perturbent l'état de surface ou réflectance de la frondaison, il a donc fallu effectuer un nouveau découpage de l'expérience afin de localiser 25 parcelles élémentaires (au lieu des 112 prévues au protocole) ne présentant pas plus de 10 % d'arbres morts (Tabl. III). De dimensions réduites, elles comportent seulement de 4 à 11 pixels chacune. Le Marihat Research Center a effectué en 1987 sur ces parcelles : des prélèvements foliaires pour analyse, des mesures de Leaf Area Index (1) (LAI) et de hauteur des arbres. Une évaluation des types de végétation présents dans la strate herbacée du sous-étage a également été faite. De plus l'inventaire des arbres morts et malades a été établi pour 72 sous-parcelles afin de rechercher une éventuelle relation entre l'intensité de la maladie et l'état de surface des plantations.

Des observations complémentaires ont été également effectuées dans 36 parcelles d'au moins 16 pixels chacune. Elles représentent 4 types de zones-test choisies dans plusieurs années de plantation d'après la composition colorée de l'image SPOT :

Ces zones facilement repérables sur le terrain étaient homogènes au point de vue radiométrique : réflectance dans le canal XS_3 ou Proche Infra-Rouge (PIR) et Indice de Végétation (IVG). Elles ont fait l'objet en 1987 des mêmes observations que les 25 parcelles de l'expérience. Un relevé sanitaire qui distingue 4 niveaux d'attaque du *ganoderma* a également été établi.

— La phase terminale au laboratoire

La recherche des plus fortes corrélations entre les variables « terrestres » (hauteur, longueur du rachis, analyses foliaires...) et « satellitaires » (XS_2 , XS_3 , IVG...) (2) à partir des données recueillies sur le terrain (Tabl. III) s'est faite par la technique de régression pas à pas. Bien que difficilement interprétable, une analyse canonique a été effectuée pour trouver la meilleure corrélation possible entre l'ensemble des valeurs terrestres et satellitaires. Six groupes ont ainsi pu être identifiés et leur distribution spatiale reconnue par une classification supervisée (3) de l'image (Fig. 9).

(1) La méthode utilisée est celle proposée par Corley et Hardon qui met en jeu un coefficient de forme des feuilles qui a été établi en Malaisie et qui n'est peut-être pas parfaitement adapté au matériel végétal planté en Indonésie.

(2) Pour réduire les éventuelles erreurs de repérage dans les petites parcelles en particulier et pour donner plus de poids aux grandes parcelles, les valeurs radiométriques ont été pondérées par le nombre de pixels.

(3) Classification par segmentation « hypercube ».

TABLEAU III. — Récapitulation des mesures et observations faites en 1987
— (Summary of measurements and observations made in 1987)

Bloc (Block)	Parc (Plot)	DATPL	GANO ₁	GANO ₂	GANO ₃	GANO ₄	GANO ₁₂₃	IF (1) (LAI)	Hauteur (Height)	Rachis	NPixel	XS ₂	XS ₃	IVG (2) (VI)	N	P	K	CA	Mg	CL	S
			%	%	%	%	%		cm	cm								Teneurs foliaires (leaf analysis)			
Expérence (Experiment)																					
TI	1	75	.	.	.	4.20	2.80	6.99	797	642	4	23.00	108.00	212.25	2.447	0.137	0.753	0.566	0.162	0.488	0.198
TI	5	75	.	.	.	3.60	2.70	6.65	812	648	4	22.75	107.75	212.00	2.273	0.134	0.776	0.641	0.124	0.610	0.195
TIU	3	75	.	.	.	6.00	1.70	5.43	701	611	8	24.10	106.13	208.75	2.488	0.161	0.908	0.624	0.119	0.570	0.234
TIU	5	75	.	.	.	3.50	7.00	5.82	670	601	6	23.83	107.30	209.80	2.642	0.154	0.851	0.673	0.116	0.627	0.236
T ₀ II	1	75	.	.	.	4.10	4.20	5.26	748	571	4	24.00	103.25	208.00	1.894	0.123	0.858	0.413	0.172	0.337	0.179
T ₀ II	2	75	.	.	.	7.70	1.40	4.84	701	583	9	23.30	105.70	209.80	1.989	0.136	0.879	0.487	0.198	0.353	0.201
T ₀ II	3	75	.	.	.	4.40	5.90	5.56	807	640	4	23.75	106.50	209.00	2.192	0.148	0.889	0.479	0.135	0.266	0.208
T ₀ II	5	75	.	.	.	9.80	0.70	5.44	802	647	7	23.60	105.00	209.30	2.151	0.139	0.869	0.482	0.122	0.396	0.192
T ₀ II	6	75	.	.	.	6.50	0.00	5.12	728	606	6	23.70	105.70	209.30	2.032	0.137	0.890	0.427	0.133	0.290	0.198
T ₀ II	7	75	.	.	.	6.70	4.00	5.59	727	621	4	23.00	107.25	211.00	2.320	0.158	0.990	0.492	0.121	0.316	0.209
T ₀ II	8	75	.	.	.	5.30	5.30	5.79	712	598	4	23.50	108.75	210.75	2.325	0.147	0.848	0.607	0.122	0.464	0.213
N ₀ II	5	75	.	.	.	5.60	2.80	5.85	733	643	8	23.60	107.80	209.90	2.322	0.155	0.805	0.594	0.167	0.676	0.210
N ₀ II	3	75	.	.	.	7.00	4.00	5.45	705	584	6	23.83	107.20	209.70	2.356	0.147	1.032	0.543	0.124	0.579	0.211
N ₀ II	1	75	.	.	.	10.00	2.00	4.50	698	611	9	24.20	105.70	208.60	2.323	0.153	0.855	0.599	0.128	0.590	0.202
N ₀ I	4	75	.	.	.	5.10	1.70	4.99	708	558	4	24.75	103.50	207.50	1.999	0.128	0.863	0.559	0.190	0.624	0.180
N ₀ Mg ₀ II	8	75	.	.	.	3.90	7.90	5.77	809	546	9	22.70	109.40	212.60	2.187	0.155	0.851	0.620	0.161	0.543	0.201
P ₀ I	1	75	.	.	.	1.10	7.80	7.40	813	630	4	24.50	106.75	208.50	2.362	0.141	0.884	0.514	0.171	0.579	0.215
P ₀ I	5	75	.	.	.	2.30	9.30	7.66	845	618	6	24.00	108.00	208.50	2.406	0.149	0.853	0.534	0.180	0.597	0.210
P ₀ II	7	75	.	.	.	5.50	5.50	4.89	620	587	6	23.30	107.50	210.00	2.411	0.148	0.856	0.614	0.131	0.566	0.227
P ₀ II	5	75	.	.	.	7.00	1.40	6.32	723	588	11	23.10	108.50	211.10	2.500	0.155	0.923	0.567	0.140	0.587	0.219
P ₀ II	3	75	.	.	.	1.47	5.90	5.80	573	601	4	24.75	107.80	208.50	2.162	0.155	0.878	0.585	0.167	0.639	0.198
K ₀ II	1	75	.	.	.	6.00	8.00	6.91	800	633	7	22.80	107.14	211.60	2.323	0.153	0.855	0.599	0.128	0.590	0.202
K ₀ II	5	75	.	.	.	4.20	5.60	6.14	850	634	9	23.30	109.00	211.00	2.315	0.144	0.926	0.515	0.128	0.337	0.218
Mg ₀ I	2	75	.	.	.	1.47	7.35	6.70	794	680	4	23.25	106.25	211.00	2.298	0.145	0.856	0.590	0.122	0.602	0.290
Mg ₀ II	1	75	.	.	.	8.60	4.00	5.86	709	638	6	24.33	107.70	209.20	2.295	0.145	0.881	0.619	0.117	0.568	0.215
Parcelles complémentaires (Additional plots)																					
26A	.	79	20.54	0.44	0.00	4.37	20.98	6.06	526	605	39	22.56	105.40	211.50	2.609	0.172	1.068	0.682	0.136	0.654	0.217
23	.	75	1.95	0.32	0.00	5.94	8.21	5.12	652	580	50	24.28	104.40	207.80	2.252	0.146	0.849	0.614	0.211	0.631	0.186
14	1	75	8.70	4.40	4.40	21.70	17.50	4.30	673	533	4	24.75	100.75	205.50	1.887	0.125	0.887	0.461	0.231	0.480	0.128
14	2	75	28.00	0.00	4.40	20.00	32.40	3.69	715	529	4	24.50	101.50	206.50	1.749	0.123	0.847	0.568	0.224	0.405	0.126
14	3	75	25.00	0.00	0.00	25.00	25.00	3.15	575	531	6	24.80	104.00	206.30	1.865	0.128	0.740	0.712	0.268	0.643	0.134
14	4	75	29.00	0.00	0.00	4.20	29.00	3.62	578	537	4	25.25	103.50	206.50	1.874	0.121	0.789	0.500	0.198	0.350	0.163
14	5	75	26.00	0.00	0.00	17.40	26.00	3.53	663	538	4	25.00	100.25	205.80	1.763	0.120	0.790	0.492	0.228	0.376	0.145
14	6	75	8.80	14.70	17.60	5.90	41.10	4.46	629	565	6	24.70	103.00	207.00	1.815	0.123	0.753	0.591	0.285	0.590	0.127
14	7	75	48.00	4.00	4.00	16.00	56.00	3.82	657	567	4	24.50	101.25	206.50	2.127	0.136	0.947	0.502	0.235	0.251	0.145
14	8	75	42.80	0.00	0.00	10.70	42.80	4.44	615	590	4	24.75	102.25	207.00	1.982	0.125	0.649	0.560	0.296	0.378	0.157
14	9	75	26.80	0.00	4.90	12.20	31.70	4.64	644	615	6	23.80	101.80	207.70	2.121	0.134	0.859	0.548	0.206	0.423	0.202
10A	76	6.63	0.00	0.00	0.00	4.25	6.63	6.34	695	605	16	22.60	109.90	212.60	2.329	0.145	0.895	0.582	0.150	0.551	0.134
10B	75	37.30	2.85	1.70	11.40	41.85	4.82	686	517	30	24.40	104.20	207.90	1.955	0.131	0.863	0.699	0.254	0.693	0.132	
26	.	79	2.28	0.00	1.14	2.15	3.42	5.58	496	559	18	23.25	102.25	208.80	2.546	0.158	0.813	0.662	0.137	0.567	0.212
1	.	84	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.80	192	344	25	25.30	143.60	217.36	2.675	0.168	1.031	0.838	0.208	0.697	0.230
4	76	26.20	1.07	1.00	6.58	28.27	5.10	586	577	16	23.00	102.00	208.80	2.399	0.153	0.788	0.643	0.187	0.550	0.214	
6	84	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.18	176	307	15	28.00	128.70	210.00	2.661	0.160	0.929	0.821	0.237	0.819	0.208
24	.	75	21.00	5.00	3.00	32.00	29.00	.	.	.	15	24.80	110.80	209.40	.	.	.	.	.	.	.
8	.	75	31.00	8.00	7.00	38.00	46.00	.	.	.	30	25.00	111.70	209.00	.	.	.	.	.	.	.

(1) IF = Indice Foliaire (LAI = Leaf Area Index).

(2) IVG = Indice de Végétation (VI = Vegetation Index)

Discussion des résultats obtenus sur le plan thématique.

— Particularités du site expérimental

La nutrition minérale de toutes les parcelles retenues se caractérise par : une variabilité élevée des teneurs parcellai-

res, des carences plus ou moins fortes en N et P, une nutrition variable en S, des teneurs généralement satisfaisantes pour K, une carence presque généralisée en Mg. Dans l'expérience, le sulfate d'ammoniaque augmente les teneurs en N et S et le KCl les teneurs en Cl.

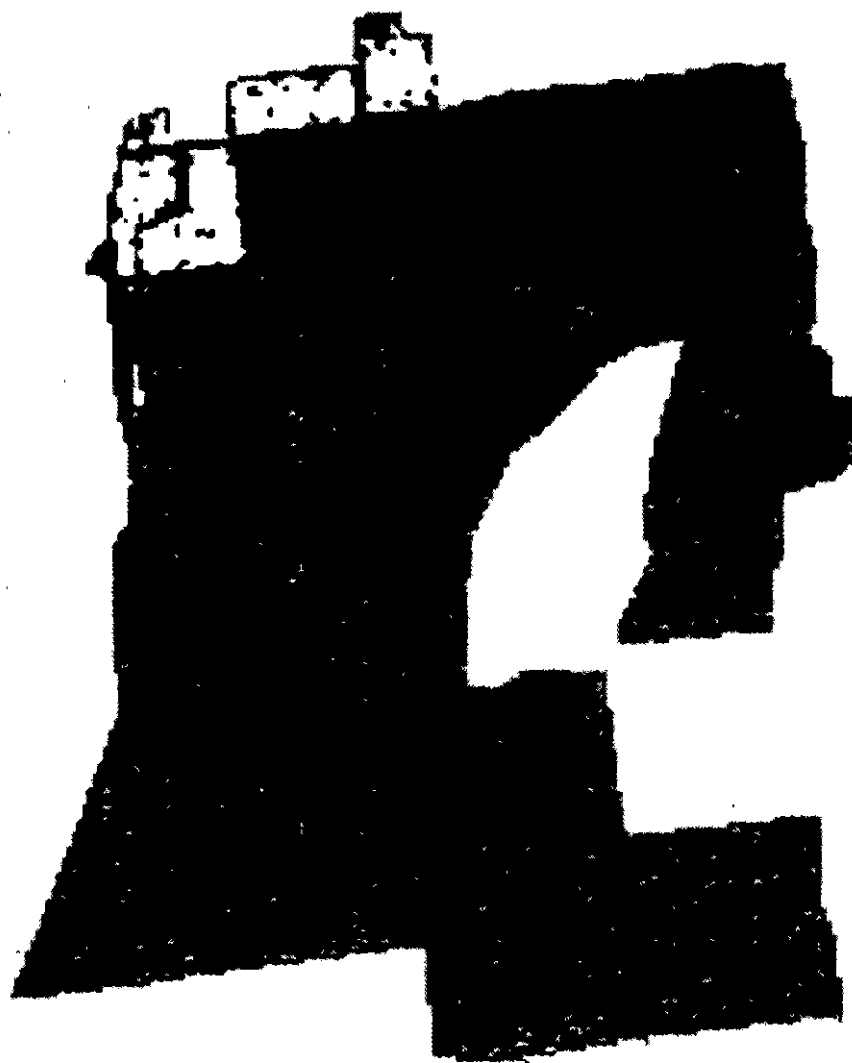


FIG. 9 — Image classée — classification multibande de type hypercube (XS_2 , XS_3 , IVG) — (Classified image — Hypercube type multiband classification (XS_2 , XS_3 , IVG)).

Types de zones-test	1	2	3	4
Réflectance PIR = XS_3 IVG	forte forte	forte faible	faible forte	faible faible
Cultures	1975 1984	1975 1984	1975 1976 1979	1979
Nombre de parcelles	4 1	2 (a) 1	17 4 2	5

(a) Observations limitées aux relevés sanitaires.

Expérience : teneurs foliaires 1986

Les teneurs moyennes par traitement ont été calculées à partir des teneurs individuelles des 112 parcelles (Tabl. IV). Les valeurs obtenues en l'absence de chaque traitement, comparées aux niveaux critiques eux-mêmes tirés de nombreuses expériences de fertilisation situées dans des plantations de nord-Sumatra, révèlent l'existence de déficiences en azote, phosphore, magnésium et de faibles teneurs en soufre, au moment de la prise de la scène SPOT. Par contre les teneurs en potassium sont satisfaisantes. L'analyse

statistique (tests de Fisher et de Duncan) montre que les effets des traitements sont limités aux teneurs en azote, soufre et chlore.

Expérience : teneurs foliaires 1987.

L'examen des teneurs des 25 parcelles choisies en 1987 (Tabl. III) confirme l'existence de carences natives plus ou moins fortes en azote, phosphore et magnésium. Par contre, en l'absence des engrais correspondants, les teneurs en soufre sont plus élevées et les teneurs en chlore un peu plus faibles. L'analyse statistique complète n'est plus possible puisque le nombre de parcelles par objet est variable, mais le test « t » montre que les traitements ont, comme en 1986, un effet limité à l'azote et au soufre (Tabl. IV). Par ailleurs, le KCl augmente fortement les teneurs en chlore. Les 25 parcelles choisies en 1987 (faible nombre d'arbres morts) sont donc assez bien représentatives de l'ensemble de l'expérience au point de vue nutrition minérale.

N° groupe	Thème	Intervalles radiométriques			Nb de pixels	Surface (ha)
		XS ₃	XS ₂	IVG		
1	Plantations adultes en bon état	109-111	22-23	212-213	2 339	93.6
2	Plantations adultes aux feuilles inclinées	103-108	22-23	210-212	6 262	250.5
3	Jeunes plantations en bon état	120-148	24-28	213-219	817	32.3
4	Jeunes plantations en mauvais état	124-132	27-29	208-211	108	4.3
5	Zones déficientes (feuilles jaunes)	99-103	24-26	203-209	6 028	241
6	Zones fortement attaquées par <i>ganoderma</i>	109-119	23-27	206-213	2 640	105.6

TABLEAU IV. — Expérience : teneurs foliaires (F17) 1986 et 1987 — Moyennes par traitement —
(*Experiment : leaf contents (L17) for 1986 and 1987 — Means per treatment*)

Eléments (<i>Elements</i>)	Traitements (<i>Treatments</i>)	Niveaux critiques (<i>Critical levels</i>)	Teneurs 1986 (112 parcelles) (<i>1986 contents — 112 plots</i>)		Teneurs 1987 (25 parcelles) (<i>1987 contents — 25 plots</i>)	
			Effet des traitements (<i>Effect of treatments</i>)		Effet des traitements (<i>Effect of treatments</i>)	
			absence	présence	absence	présence
Azote	Sulfate	2.60 %	2.290	2.470	2.170	2.380*
Soufre	d'ammoniaque	± 0.175 %	0.155	0.168	0.200	0.214*
Phosphore	Phosphore de roche	0.167 %	0.146	0.151	0.146	0.145
Potassium	KCl	0.850 %	0.913	0.888	0.863	0.890
Chlore		0.5 %	0.448	0.667	0.333	0.583
Magnésium	Kieserite	0.180 %	0.147	0.152	0.147	0.140

Parcelles complémentaires (34) : teneurs foliaires 1987.

La nutrition minérale (Tabl. III (I)) des 34 parcelles choisies dans d'autres blocs de la plantation présente des caractéristiques semblables à celles de l'expérience :

- les 3 années de culture sont certainement carencées en azote et phosphore ;
- la nutrition potassique est en général assez satisfaisante ;
- la nutrition magnésienne des cultures 1975 et 1976 est très variable ; elle est très carencée (parc 10 A/1975), presque satisfaisante (parc 4/1976) ou satisfaisante pour les autres parcelles. Celle des cultures 1979 est très carencée tandis qu'elle est satisfaisante pour les cultures 1984 ;
- la nutrition en soufre est faible pour 3 parcelles sur 4 des cultures 1975, elle est satisfaisante pour les autres.

Relations entre les mesures radiométriques et les paramètres agronomiques.

Les mesures de LAI et le pourcentage d'arbres morts ont ensuite été comparés graphiquement (Fig. 10 à 13) aux

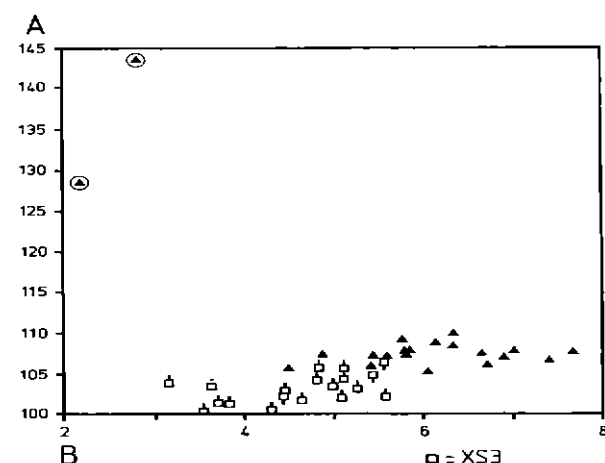


FIG. 10 — XS₃ = Fn (Indice foliaire) Toutes parcelles - Adolina — (*All plots - Adolina*)
 A = Valeurs XS₃ — (*Values XS₃*)
 B = LAI — (*LAI*)
 ▲ = Arbres jugés en bon état — (*Trees judged to be in good condition*)
 △ = Arbres jugés en mauvais état — (*Trees judged to be in poor condition*)
 ⊙ = Jeunes plantations 1984 — (*Young plantings*)

(I) Dans le tableau III les teneurs moyennes ont déjà été calculées pour les groupes de parcelles dont le développement végétatif était homogène.

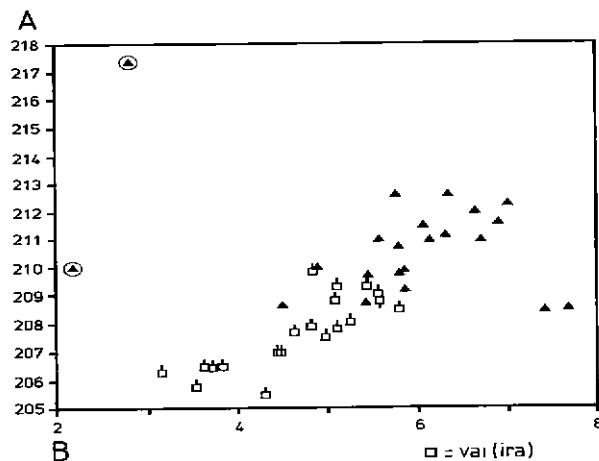


FIG. 11 — IVG = Fn (Indice foliaire). Toutes parcelles - Adolna — (VGI = Fn - Leaf index - All plots - Adolna)
 ▲ = Arbres jugés en bon état — (Trees judged to be in good condition)
 □ = Arbres jugés en mauvais état — (Trees judged to be in poor condition)
 ○ = Jeunes plantations 1984 — (Young plantings)
 A = Valeurs IVG — (VGI Values)
 B = LAI — (LAI)

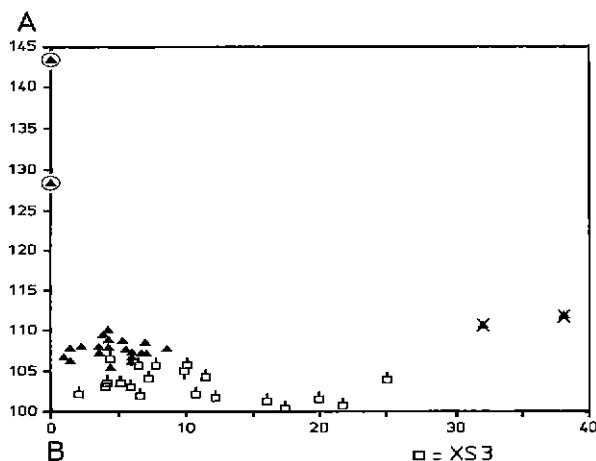


FIG. 12 — XS₃ = Fn (% arbres morts ganoderma) Toutes parcelles - Adolna — (% of trees killed by ganoderma - all plots Adolna)
 A = Valeurs XS₃ — (XS₃ Values)
 B = % arbres morts - ganoderma — (% dead trees - ganoderma)
 ▲ = Arbres jugés en bon état — (Trees judged to be in good condition)
 □ = Arbres jugés en mauvais état — (Trees judged to be in poor condition)
 ○ = Jeunes plantations 1984 — (Young plantings)
 X = Zones fortement attaquées par ganoderma — (Zones suffering severe ganoderma attack)

mesures de réflectance dans le canal XS₃ (PIR) et dans l'IVG. Les représentations graphiques montrent que l'on obtient une relation satisfaisante entre l'IVG d'une part, le LAI et le pourcentage d'arbres morts d'autre part. La position excentrée de quelques parcelles pourrait être due à des erreurs de repérage difficilement évitables, tout particulièrement quand le nombre de pixels pris en compte est faible, parfois seulement 4.

On remarque que certaines parcelles jeunes (1984) ou en « bon état » se distinguent par un comportement radiométrique particulier : elles ont une réflectance élevée dans l'IVG et une réflectance relativement plus faible dans le XS₃.

Relations entre les mesures radiométriques et les paramètres physiologiques.

La confrontation entre les données satellitaires et terrestres a été reprise uniquement pour les parcelles des cultures 1975 afin d'éliminer les effets du paramètre « date de plan-

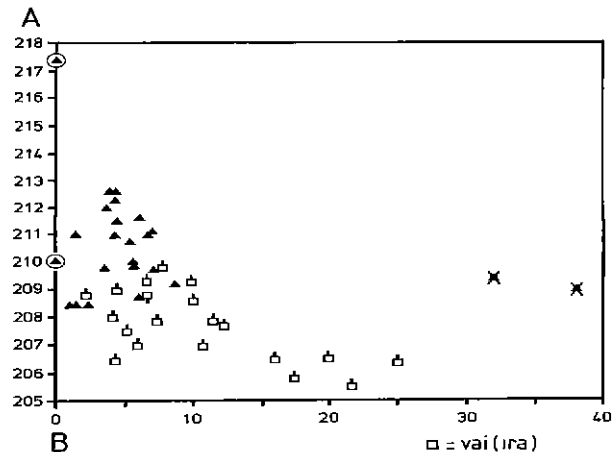


FIG. 13. — VGI = Fn (% arbres morts ganoderma). Toutes parcelles - Adolna — (VGI = Fn - % trees killed by ganoderma all plots - Adolna)
 A = Valeurs VGI — (VGI Values)
 B = % Arbres morts - ganoderma — (% dead Trees - ganoderma)
 ▲ = Arbres jugés en bon état — (Trees judged to be in good condition)
 □ = Arbres jugés en mauvais état — (Trees judged to be in poor condition)
 ○ = Jeunes plantations 1984 — (Young plantings)
 X = Zones fortement attaquées par ganoderma — (Zones suffering severe ganoderma attack).

tation». Les corrélations et les régressions pas à pas ont fait apparaître un certain nombre de relations en particulier avec le canal XS₃ (PIR).

— Le canal XS₂ est bien corrélé avec le nombre d'arbres malades et morts (Fig. 14). Il est le principal facteur qui explique dans les régressions pas à pas les variables hauteur et arbres morts.

— Le canal XS₃ (PIR) qui présente un grand étalement des mesures radiométriques apporte les informations les plus importantes puisqu'il est corrélé avec les teneurs en azote ($r = 0,77$, Fig. 15) et par voie de conséquence avec les teneurs en P ($r = 0,77$) et en S ($r = 0,79$) du fait des relations qui existent entre ces deux derniers éléments et l'azote. Il est également corrélé avec le LAI ($r = 0,76$, Fig. 16).

— La régression pas à pas montre que les éléments N, P, S et aussi K et Ca ainsi que la variable LAI sont expliqués par XS₃ seulement tandis qu'en ce qui concerne Mg et Cl il semblerait que le canal XS₂ apporte des informations complémentaires non négligeables.

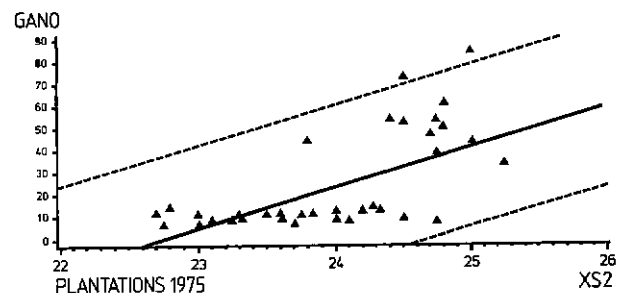
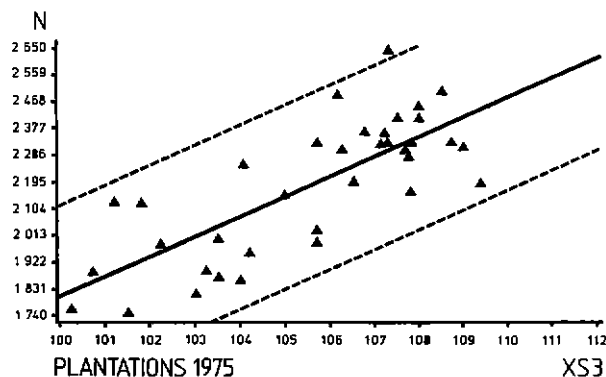
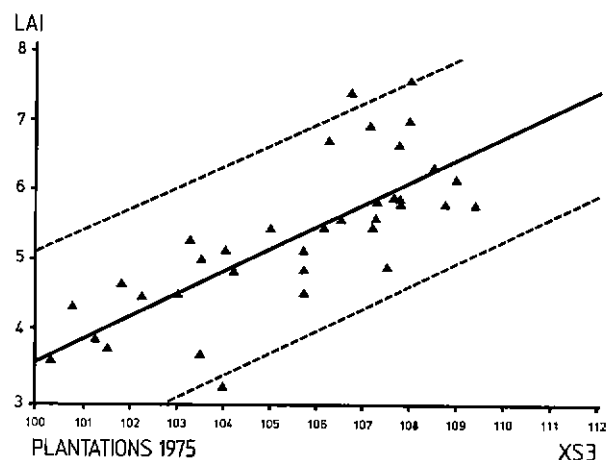


FIG. 14. — Télédétection Adolna — (Remote sensing at Adolna)

FIG. 15. — Télédétection Adolina — (*Remote sensing at Adolina*).

CONCLUSIONS

Cette première étude qui se proposait d'évaluer la possibilité d'utiliser l'imagerie du satellite SPOT à haut pouvoir de résolution dans le diagnostic des plantations de palmiers à huile, a fait apparaître l'existence de corrélations entre les mesures radiométriques et un certain nombre de paramètres physiologiques et nutritionnels de la plante. Ces résultats, bien que limités par les conditions expérimentales, sont suffisants pour envisager une poursuite de la recherche dans ce domaine. Mais compte-tenu de l'expérience acquise par ailleurs, il ne paraît pas possible d'envisager l'interprétation des signatures spectrales d'une plantation sans effectuer au préalable un étalonnage des mesures radiométriques pour chaque situation particulière.

FIG. 16. — Télédétection Adolina — (*Remote sensing at Adolina*).

A noter que la poursuite de l'étude probatoire pourrait être basée sur l'exploitation d'une ou plusieurs images, qui seraient largement valorisées par la connaissance de l'évolution du signal radiométrique dans le temps grâce à l'utilisation d'un radiomètre de terrain [6]. Il serait ainsi plus facile de déterminer la meilleure époque pour la prise des scènes.

Par ailleurs, la conduite de l'expérience a fait ressortir qu'il y avait intérêt à bien contrôler les conditions de saisie sur le terrain en fonction de l'évolution du milieu et à disposer d'un matériel portable de traitement d'images pour permettre de confronter sans délai et autant de fois que nécessaire la réalité du terrain aux résultats de l'analyse d'images.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] OCHS R. (1985) — Stratégie de mise en œuvre du contrôle nutritionnel des plantes pérennes. Gestion de la nutrition minérale, programmation des fumures *Oléagineux*, 40 (12), 583-590.
- [2] NAERT B. (1977) — Equidensités colorées appliquées à l'analyse pédologique des documents multispectraux. Photo interprétation, 311 (77), 1-9, Ed Technip, Paris.
- [3] BECKER F. *et al.* (1978). — Principes physiques et mathématiques de la Télédétection Ed CNES, Toulouse.
- [4] BARIOU R., LECAMUS D., LE HENAFF F. (1985) — Indices de végétation. Dossiers de Télédétection, Université Rennes 2.
- [5] CORLEY R. H. V., HARDON J. J. and TANG Y. (1971) — Analysis of growth of the oil palm; 1 Estimation of growth parameters and application in breeding. *Euphytica* 20, 307-315.
- [6] NAERT B. (1986) — Evolution temporelle du signal radiométrique et perception à distance des effets de la dynamique de l'eau dans les sols. Actes des Rencontres Internationales sur l'Eau et les Technologies Avancées, Montpellier, oct. 1986, 157-162.

SUMMARY

Preliminary assessment of the possibilities of using spatial remote sensing of study developments on an oil palm plantation in North Sumatra.

B. NAERT, R. GAL, A. U. LUBIS, SUWANDI, J. OLIVIN, *Oléagineux*, 1990, 45, N° 5, p 201-214.

The SPOT satellite provides images whose high definition (20 m pixel in multispectral mode) means they can be used for oil palm plantation agronomical monitoring, in particular mineral nutrition. To this end, a mineral nutrition trial was set up in 1981 on the ADOLINA (PTP VI) oil palm plantation in North Sumatra, under the terms of a protocol drawn up jointly by IRHO and the Marihat Research Station (PTP VI-VII), advised by the national space studies centre, Toulouse (France). The trial comprised fourteen 8-hectare experimental plots (N, P, K, Mg), planted in 1975. Annual agronomical monitoring, consisting of leaf analyses and records of

RESUMEN

Primera evaluación de las posibilidades de aprovechamiento de la teledetección espacial para el estudio del funcionamiento de una plantación de palma africana en el Norte de Sumatra.

B. NAERT, R. GAL, A. U. LUBIS, SUWANDI, J. OLIVIN, *Oléagineux*, 1990, 45, N° 5, p 201-214.

El satélite para la observación de la tierra SPOT proporciona imágenes de alta resolución (píxel de 20 m para un modo multiespectral), lo que permite considerar su utilización en el seguimiento agrónomo de una plantación de palma africana, en especial para la nutrición mineral. A tal efecto, en 1981 se estableció una experimentación de nutrición mineral en la plantación de palma africana de Adolina (PTP VI) en el Norte de Sumatra, de acuerdo a un protocolo establecido conjuntamente por el IRHO y la Estación de Investigaciones de Marihat (PTP VI-VII), y con la asesoría del centro nacional de estudios espaciales (Toulouse-Francia). La expe-

yield and changes in phytosanitary condition, was conducted by the Marihat station.

The first image was taken in June 1986 as part of the preliminary evaluation programme of the SPOT satellite project, and it was processed in 1987, using digital processing techniques, combined with ground observations. Considered as a preliminary study, this interpretation revealed links between near infra-red reflectance (channel XS₃) and leaf contents (N, P, Mg, S) as well as the leaf area index (L.A.I.). Channel XS₂ and the Standardized Vegetation Index

$\frac{XS_3 - XS_2}{XS_3 + XS_2}$ provide extra information linked rather more to vegetative characteristics and to phytosanitary condition. A certain number of methodological problems arose during analysis; some are due to the length of the experiment (the appearance of a disease, *Ganoderma*), whilst others are linked to local conditions such as the difficulty of obtaining images on given dates due to cloud cover or, lastly, stem from environmental factors (plantation age, soils, water reserves).

Preliminary results are sufficiently promising to encourage the continuation of methodological research, as part of the scientific collaboration between the Marihat Station and IRHO, in order to develop a technique for diagnosing the condition and evolution of oil palm plantations.

riencia estaba formada por 14 parcelas experimentales (N, P, K, Mg) de 8 hectáreas cada una, sembradas en 1975. La estación de Marihat realizó un seguimiento agronómico anual que incluyó el análisis de muestras foliares, el registro de la producción y la evolución del estado de sanidad. Una primera imagen ha sido sacada en junio de 1986, dentro del proyecto programa de evaluación preliminar del satélite SPOT, y se explotó en 1987, utilizando las técnicas de tratamiento numérico junto con observaciones de campo. Esta interpretación se consideró un estudio preliminar, y destacó relaciones entre los valores de reflexión en el infrarrojo próximo (canal XS₃) y los contenidos foliares (N, P, Mg, S), como también con el Índice Foliar (L.A.I.).

El canal XS₂ y el índice de Vegetación Normalizado

$\frac{XS_3 - XS_2}{XS_3 + XS_2}$ proporcionan informaciones de complemento que se relacionan más bien con las características vegetativas y el estado fitosanitario. Durante el análisis aparecieron unos determinados problemas de tipo metodológico; algunos son debidos a la duración del experimento (aparición de una enfermedad, *Ganoderma*), mientras que otros se relacionan con las condiciones del lugar, como la dificultad para obtener imágenes en unas determinadas fechas por la cobertura de nubes, y otros por último se deben al medio ambiente (edad de la plantación, suelos, reservas de agua...). Estos primeros resultados son lo suficientemente alentadores como para mover a proseguir la investigación metodológica, dentro de la colaboración científica entre la estación de Marihat y el IRHO, con el fin de desarrollar una técnica de diagnóstico sobre el estado y el funcionamiento de las plantaciones de palma africana.

Preliminary assessment of the possibilities of using spatial remote sensing to study developments on an oil palm plantation in north Sumatra

B. NAERT (1), R. GAL (2), A. U. LUBIS (3), SUWANDI (4), J. OLIVIN (5)

INTRODUCTION

The running of an oil palm plantation and the resulting yield depend on many factors, mineral nutrition being one of the most important. The soils in the intertropical humid zone are in fact very often poor in available mineral elements, due to their pedological evolution. The production potential of the planting material selected can only be fulfilled after correcting the soil's mineral deficiencies by applying fertilizer, according to a schedule drawn up after leaf analyses carried out every year on a sample taken from 20 to 30 oil palms in each LSU (Leaf Sample Unit) on the plantation. The mineral element contents of the leaves in the sample are compared with the optimum content, deduced in another experiment, in order to determine fertilizer rates via « ad hoc » schedules [1].

This method has long since proved its reliability for managing fertilization on plantations. Its use is widespread. It does, however, have certain weaknesses, due to the fact that the number of samples which can be taken and analysed is necessarily limited. In effect, it is not generally possible to set up LSUs covering less than 25, even 100 hectares; this means that only 7 to 1.7% of the trees are sampled. The choice of « LA trees » is therefore important, since the sample's representativity of the LSU as a whole depends upon it. Variability may be overlooked, even by an experienced observer, since mineral nutrition can be deficient well before the appearance of external symptoms. Furthermore, the method is relatively static, due to the difficulty of conducting several leaf analysis rounds per year.

From 1981 onwards, it appeared that the interpretation of satellite images might provide a solution for perfecting agronomical monitoring of plantations. It is, obviously, out of the question for the moment to stop using leaf analysis, but the aim is to supplement this. In preparation for using the SPOT (6) satellite, which has a high spatial resolution capacity (20 m pixel in multispectral mode), an adapted experiment was set up in 1982, in collaboration with Marihat Research Centre (Indonesia), and with advice from CNES (France), on an oil palm plantation (Adolina) in North Sumatra. Interpretation was carried out jointly by Marihat and IRHO in 1987. This comprised digital image analysis and establishing the correlations which exist between radiometric measurements (spectral signatures) and the measurements of certain physiological parameters.

MATERIAL AND METHODS

The Adolina plantation (PTP VI) is 36 km east of Medan (north Sumatra), latitude 3°37'30" north, longitude 9°57'20" east. Annual rainfall (1,541 mm on average from 1977 to 1986) is spread over a very rainy season from September to December, and a less rainy period from January to August. The land is flat. The soils, derived from volcanic and alluvial formations, belong to 4 pedological categories, 2 types of sandy regosol, which differ in terms of drainage capacity, a series of very compact waterlogged sandstones and a series of alluvial soils. The water table is close to the surface in the latter two cases.

The experiment, covering a total of 112 ha, was set up in 1982 on 1975 plantings, essentially on regosols, with some waterlogged and alluvial soils (Fig. 1). It comprises 7 treatments, replicated twice.

(6) SPOT satellite pour l'observation de la terre (earth observation satellite).

(1) INRA-Montpellier (France), remote sensing

(2) Agronomist (France)

(3) Director, Marihat research centre (Indonesia).

(4) Deputy Director, Marihat research centre (Indonesia).

(5) IRHO/CIRAD agronomy Division.

Each elementary plot, covering 8 ha (400 m × 200 m), is divided into 1 ha sub-plots (5 × 5 pixels). However, due to the difficulties encountered in setting up, it was not possible to group the plots from each replication together in a single block (Fig. 1). The 7 treatments studied and the fertilizer rates (kg/tree) applied annually in two goes (april and august) since 1981 are given in table I.

Agronomical monitoring at the 1 ha sub-plot level has comprised taking one leaf sample per year since 1981 (leaf 17 on 30 trees per sub-plot), and counting the number of trees affected by *ganoderma*. The rates were established by the Marihat laboratories, and also by those at CIRAD for samples from 1986 and 1987.

The SPOT image (1) used is multispectral. It was taken on 8th June 1986 at an angle of 19°3'. The three channels which make up the image cover the following wavebands respectively.

- XS₁ : 500-559 µm,
- XS₂ : 610-680 µm, Green,
- XS₃ : 790-890 µm, Near Infrared (NIR).

Each of the channels contains 3,000 × 3,000 20 m pixels (picture elements), coded on 256 levels (8 bits). These data underwent « level 1b » pre-processing, i.e. radiometric and geometric correction of factors linked to distortions caused by the nature of the system : the Earth's rotation, panoramic effects, streak effect, shooting angle. Whilst, strictly speaking, cartographic projection is not possible on the experimental scale in question, the images are satisfactory in comparison with the accuracy of available maps. The information stored covers an area 30 × 30 km. The data were supplied on 6,250 BPI Computer Compatible Tape (CCT) and three photographic films representing 1/400,000 scale displays of the three channels recorded.

The experimental protocol comprised three successive phases :

- a) A preliminary laboratory phase, during which the images and digital data available were « preprocessed », i.e. prepared using « standard » processing, designed to improve their presentation and make them easier to read (Figs. 2, 3 and 4).
- b) An intermediate field phase, designed to compare remote sensing data with observable reality, measurable using conventional methods, in order to sort out the significant information and challenge the experimental methods defined *a priori*.
- c) A synthesis phase, aiming to improve the analysis method through practice and draw up a certain number of specific proposals and conclusions on the use of satellite imagery.

RESULTS AND DISCUSSION

Discussion of results obtained on a technical level.

— In the preliminary laboratory phase.

- Image extracts were enlarged to scale and made suitable to be superimposed on existing maps, in order to facilitate photo-interpretation and field identification. A certain number of photographic processes, designed to increase the contrasts of the various channels and emphasize the differences between the channels (2), were carried out on the extracts (Fig. 5). In use, the documents proved very effective for identification purposes, but the fact that they represent things analogically, in black and white, meant that they were insufficient for objective cartographic interpretation. Converting them into colour equidensities should make them easier to use [2].

- 256 × 256 pixel « mini-images », covering the experimental site, were analysed using an image processing unit (3) in order to improve signal dynamics by linear distribution of the useful elements of the mini-images, produce a certain number of combinations of data used conventionally... to study the correlations which exist between the information gathered from the ground and that from the various channels [3].

Hence it appeared that channels XS₁ and XS₂ were sufficiently correlated (Fig. 6) for channel XS₁ not to be considered useful in preliminary analysis. Channel XS₃ reflectance distribution is bimodal (Fig. 8), and the values corresponding to the highest peak enable the oil palm plantations to be distinguished from the surrounding paddy fields (which have lower reflectance). On this channel, few differences appear within the plantation itself, compared with marked differences in the external environment (Fig. 8). Using the

standardized (4) vegetation index [4], which provides a representation of both chlorophyll activity and the plant cover density, proved useful for subdividing plantations (Fig. 4).

It proved necessary to « smooth » the data using « sliding windows » (5) in order to obtain documents with exploitable cartographic significance.

— The on-site phase placed in question the experimental protocol planned originally, due to the high mortality rate caused by a severe *Ganoderma* fungus attack in 1984/1985. The disease, which develops in irregular patches, led to the deaths of 23 % of the trees in the experiment in 1986 when the SPOT scene was taken, and 31 % in 1987 during field observations (Table II).

To prevent « ground effects » caused by the deaths of certain trees affecting the surface or reflectance state of the foliage, it was necessary to re-divide the experiment in order to obtain 25 elementary plots (rather than the 112 planned in the protocol) with no more than 10 % of dead trees (Table III). The plots are smaller, containing only 4 to 11 pixels each. In 1987, Marihat Research Centre carried out the following operations on these plots : leaf samples for analysis, measurement of the Leaf Area Index (6) (LAI) and of tree height. An evaluation was also carried out of the types of vegetation present in the herbaceous stratum of the undergrowth. In addition, an inventory was made of dead and diseased trees in 72 subplots in an attempt to find a possible relationship between disease intensity and the surface state of the plantation.

Complementary observations were also made on 36 plots of at least 16 pixels each. These represent 4 types of test zone chosen from several planting years according to the colour composition of the SPOT image :

Type of test zone	1	2	3	4
Reflectance				
NIR = XS ₃	high	high	low	low
VGI	high	low	high	low
Plantings	1975	1984	1975	1984
Number of plots	4	1	2*	1

* Observations limited to phytosanitary samples.

These zones, easy to identify on the ground, were uniform from a radiometric point of view : channel XS₃ or Near Infrared (NIR) reflectance and Vegetation Index (VGI). They underwent the same observations as the 25 plots in the experiment in 1987. A phytosanitary check, distinguishing 4 levels of *Ganoderma* attack, was also carried out.

— The terminal laboratory phase.

The search for stronger correlations between the « ground » variables (height, rachis length, leaf analyses, etc.) and « satellite » variables (XS₂, XS₃, VGI, etc.) (7) from data gathered in the field (Table III) was conducted using the step by step regression technique. Although difficult to interpret, a canonical analysis was carried out so as to find the best possible correlation between all the terrestrial values and all the satellite values. Six groups were identified in this way, and their spatial distribution recognized by supervised image classification (8) (Fig. 9).

Discussion of results obtained on a thematic level.

— Details of the experimental site.

The mineral nutrition of all of the plots adopted was characterized by : high plot content variability, more or less pronounced N

$$(4) \text{ VGI} = \text{XS}_1 - \text{XS}_2 / \text{XS}_3 + \text{XS}_2$$

(5) Giving the pixel the most represented value of the matrix made up of the 8, 24, etc. closest pixels

(6) The method used was that proposed by Corley and Hardon, which brings into play a leaf shape coefficient, and which was drawn up in Malaysia and thus may not be perfectly adapted to the planting material used in Indonesia.

(7) To reduce possible identification errors in small plots in particular and to give more weight to the larger plots, the radiometric values were weighted by the number of pixels

(8) Classification by « hypercube » segmentation.

(1) Catalogued under reference KJ : 264-343

(2) Print of superimposed XS₂ and XS₃ negatives, for example.

(3) CIRAD/DETEC Pericolor 1000 (Remote Sensing Delegation).

Group No.	Theme	Radiometric intervals			No of pixels	Area (ha)
		XS ₃	XS ₂	IVG		
1	Adult plantings in good condition	109-111	22-23	212-213	2 339	93.6
2	Adult plantings with inclined leaves	103-108	22-23	210-212	6 262	250.5
3	Young plantings in good condition	120-148	24-28	213-219	817	32.3
4	Young plantings in poor condition	124-132	27-29	208-211	108	4.3
5	Deficient zones (yellow leaves)	99-103	24-26	203-209	6 028	241
6	Zones suffering from severe <i>Gonaderma</i> attack	109-119	23-27	206-213	2 640	105.6

and P deficiencies, variable S nutrition, generally satisfactory K contents, almost universal Mg deficiency. In the experiment, ammonium sulphate increased N and S contents, and KCl increased Cl content.

Experiment : 1986 leaf contents.

Mean contents per treatment were calculated based on individual contents in each of the 112 plots (Table 4). When compared with the Critical Levels, themselves taken from many fertilization experiments on plantations in North Sumatra, the values obtained in the absence of each treatment revealed the existence of nitrogen, phosphorus, magnesium deficiencies and low sulphur contents, at the time when the SPOT scene was taken. However, potassium contents were satisfactory. Statistical analysis (Fisher and Duncan tests) showed that the effects of the treatments were limited to nitrogen, sulphur and chlorine contents.

Experiment : 1987 leaf contents.

Examination of the contents in the 25 plots chosen in 1987 (Table III) confirmed the existence of inherent and more or less pronounced nitrogen, phosphorus and magnesium deficiencies. However, in the absence of corresponding fertilizers, the sulphur contents were higher and the chlorine contents a little lower. Complete statistical analysis is no longer possible since the number of plots per treatment is variable, but the « t » test shows that as in 1986, the effect of the treatments was limited to nitrogen and sulphur (Table IV). In other respects, KCl greatly increased chlorine contents. The 25 plots chosen in 1987 (low number of dead trees) were, therefore, quite representative of the experiment as a whole from a mineral nutrition point of view.

Additional plots (34) : 1987 leaf contents.

The mineral nutrition (Table III) (1) of the 34 plots chosen in other blocks on the plantation had similar characteristics to that of the experiment :

- the 3 planting years had clear nitrogen and phosphorus deficiencies ;
- potassium nutrition was generally quite satisfactory ;
- magnesium nutrition on the 1975 and 1976 plantings was very variable, there was a marked deficiency (plot 10 A/1975), almost satisfactory (plot 4/1976) or satisfactory for the other plots. The 1979 plantings were very deficient, whilst the 1984 plantings were satisfactory ;
- sulphur nutrition was poor for 3 out of 4 plots from the 1975 planting and satisfactory for the others.

Relationships between radiometric measurements and agronomic parameters.

LAI measurements and the percentage of dead trees were then compared graphically (Figs 10 to 13) with channel XS₃ (NIR) and

VGI reflectance measurements. The graphs show that a satisfactory relationship is obtained between VGI on the one hand, and the LAI and the percentage of dead trees on the other. The offset position of some plots could be due to identification errors, which are difficult to avoid, particularly when the number of pixels taken into account is low, sometimes only 4.

It is noted that certain young plots (1984) or plots in « good condition » are distinguished by a specific type of radiometric performance : they have high VGI reflectance, but relatively low XS₃ reflectance.

Relationships between radiometric measurements and physiological parameters.

The comparison of satellite and ground data was only applied to the 1975 planting plots, in an attempt to eliminate the effects of the « planting date » parameter. The correlations and step by step regressions revealed a certain number of relationships, particularly with channel XS₃ (NIR).

— Channel XS₂ is well correlated to the number of dead and diseased trees (Fig. 14). It is the major factor explaining the height and dead tree variables in the step by step regressions.

— Channel XS₃ (NIR), which presents a wide range of radiometric measurements, provides the most important information, since it is correlated to nitrogen contents ($r = 0.77$ -Fig. 15) and as a result to P ($r = 0.77$) and S contents ($r = 0.79$). due to the relationship between the latter two elements and nitrogen. It is also correlated to the LAI ($r = 0.76$ -Fig. 16).

— Step by step regression shows that the elements N, P, S and also K and Ca, as well as the LAI variable, are only explained by XS₃, whilst as far as Mg and Cl are concerned, channel XS₂ appears to provide not inconsiderable additional information.

CONCLUSIONS

This preliminary study, whose aim was to assess the possibility of using SPOT high resolution satellite imagery in oil palm plantation diagnosis, has revealed the existence of correlations between radiometric measurements and a certain number of plant physiology and nutrition parameters. These results, although limited by the experimental conditions, are sufficient to consider continuing research in this field. However, considering the experience acquired elsewhere, it does not seem possible to consider interpreting the spectral signatures of a plantation without first standardizing radiometric measurements for each particular situation.

It should be noted that the continuation of the preliminary study could be based on exploiting one or several images, which would largely be valorized by knowledge of the radiometric signal's evolution over time, using a field radiometer [6]. It would thus be easier to determine the best time for taking scenes.

In addition, it emerged while conducting the experiment that it would be wise to check data acquisition conditions in the field according to environmental evolution, and to have portable image processing equipment available to make it possible to compare rapidly and as many times as necessary the true field situation with the results of image analysis.

(1) In Table III, the mean contents have already been calculated for the plot groups with uniform plant growth.